

泡利的错误

卢昌海

一、引言

几年前，在翻译美国物理学家温伯格（Steven Weinberg）的《爱因斯坦的错误》和撰写《玻尔的错误》（发表于本刊 2013 年第 5 期）时，我就萌生过一个念头，那就是继《爱因斯坦的错误》和《玻尔的错误》之后，若还有哪位现代物理学家的错误值得一写的话，就得说是泡利了。这也正是本文的主题——泡利的错误——之缘起。

在《玻尔的错误》中我曾写道：玻尔的错误虽然远不如爱因斯坦的错误那样出名，甚至可以说是冷僻话题，但他在犯错时却是比爱因斯坦更具“那个时代的精神与背景”的领袖科学家，他的错误也因此要比爱因斯坦的错误更能让人洞察“那个时代的精神与背景”。

现在要写泡利的错误，自然就想到了一个有趣的问题：如果说爱因斯坦的错误最出名，玻尔的错误最有代表性，那么泡利的错误有什么特点呢，或者说“最”在哪里呢？我认为是最有戏剧性。

这戏剧性来自泡利本人的一个鲜明特点，那便是我在《让泡利敬重的三个半物理学家》一文（发表于本刊 2012 年第 4 期）中介绍过的，泡利是一位以批评尖刻和不留情面著称的物理学家。而且泡利的批评尖刻和不留情面绝不是“信口开河”型的，而是以缜密思维和敏锐目光为后盾的，惟其如此，他的批评有着很重的分量，受到同行们的普遍重视，或者用玻尔的话说：“每个人都急切地想要知道泡利对新发现和新思想的总是表达得强烈而有幽默感的反应”。玻尔不仅这么说了，而且还“身体力行”地为他所说的“每个人”做了最好的注脚。在玻尔给泡利的信中，常常出现诸如“我当然也很迫切地想听到您对论文内容的意见”（1924 年 2 月 16 日），“请给予严厉的批评”（1926 年 2 月 20 日信），“我将很乐意听取您有关所有这些的看法，无论您觉得适宜用多么温和或多么严厉的

语气来表达”（1929 年 7 月 1 日信）那样的话。这种批评尖刻和不留情面的鲜明特点，作为后盾的缜密思维和敏锐目光，以及所受同行们的普遍重视，都使得泡利的错误具有了别人的错误难以企及的戏剧性。

与玻尔的情形相似，关于泡利究竟犯过多少错误，似乎也没有人罗列过，不过也可以肯定，他犯错的数量与类型都远不如爱因斯坦那样“丰富多彩”。原因呢，也跟玻尔的相似，即“与其说是他在避免犯错方面比爱因斯坦更高明，不如说是因为他的研究领域远不如爱因斯坦的宽广，从而犯错的土壤远不如爱因斯坦的肥沃”——当然，这都是跟爱因斯坦相比才有的结果，若改为是跟一位普通的物理学家相比，则无论玻尔还是泡利的研究领域都是极为宽广的。

那么，在泡利所犯的错误之中，有哪些值得介绍呢？我觉得有两个：一个关于电子自旋，一个关于宇称守恒。

二、泡利的第一次错误：电子自旋

电子自旋概念的诞生有一段虽不冗长却不无曲折的历史，而这曲折在很大程度上受到了泡利的影响。在很多早期教科书或现代教科书的早期版本中，电子自旋概念都是被叙述成是 1925 年底由荷兰物理学家乌仑贝克（George Uhlenbeck）和古兹米特（Samuel Goudsmit）首先提出的。这一叙述以单纯的发表时间及以发表时间为依据的优先权而论，是正确的，但从历史的角度讲，却不无可以补正的地方。事实上，在比乌仑贝克和古兹米特早了大半年的 1925 年 1 月，德国物理学家克罗尼格（Ralph Kronig）就提出了电子自旋的假设，而且他的工作比乌仑贝克和古兹米特的更周详，比如对后者最初没有分析、甚至不知道该如何分析的碱金属原子双线光谱进行了分析。

克罗尼格是美国哥伦比亚大学的博士研究生，当时却正在位于图宾根的德国物理学家朗德（Alfred Landé）的实验室访问。克罗尼格提出电子自旋的假

设之后不久，泡利恰巧也到朗德的实验室访问。于是他就见到了这位比自己想象中年轻得多的著名物理学家（克罗尼格后来回忆说，他当时想象的泡利是比自己大得多并且留胡子的）。可是，听克罗尼格叙述了自己的想法后，泡利却当头泼了他一盆冷水：“这确实很聪明，但当然是跟现实毫无关系的。”这冷水大大打击了克罗尼格对自己假设的信心，使他没有及时发表自己的想法。约一年之后，当他见到乌仑贝克和古兹米特有关电子自旋的论文引起反响时^①，不禁惊悔交集，在1926年3月6日给荷兰物理学家克拉默斯（Hans Kramers）的信中这样写道：我特别意外而又最感滑稽地从2月20日的《自然》上注意到，带磁矩的电子在理论物理学家们中间突然又得宠了。但是乌仑贝克和古兹米特为什么不叙述为说服怀疑者而必须给出的新论据呢？……我有些后悔因否定意见而没在当时发表任何东西，……今后我将多相信自己的判断而少相信别人的。

这里提到的“带磁矩的电子”就是指有自旋的电子，因为有自旋的电子必定有磁矩（在“自旋”一词足够流行之前，有自旋的电子常被称为“带磁矩的电子”、“磁性电子”、“旋转电子”等）。克罗尼格之所以表示“特别意外而又最感滑稽”，并提到“为说服怀疑者而必须作出的新论据”，是因为——如前所述——他在电子自旋方面的工作比乌仑贝克和古兹米特的更周详，却遭遇了泡利的冷水。不仅如此，他在几个月后曾访问过哥本哈根，在那里跟克拉默斯本人及海森伯（Werner Heisenberg）也谈及过电子自旋假设，却也没得到积极反响。而短时间之后，乌仑贝克和古兹米特有关电子自旋的并不比他当年更深入，也并无新论据的论文却引起了反响。

克拉默斯是玻尔在哥本哈根的合作者，因此玻尔也很快知悉了此事，他写信给克罗尼格表达了惊愕和遗憾，并希望他告知自己想法的详细演变，以便在注定会被写入史册的电子自旋概念的历史之中得到记载。收到玻尔的信时克罗尼格已将自己的工作整理成文，寄给了《自然》（该论文于稍后的1926年4月发表）。在给玻尔的回信中他写道：……在有关电子自旋上公开提到我自己，我相信还是不做这样的事情

为好，因为那只会使情势复杂化，而且也很难使乌仑贝克和古兹米特太高兴。如果不是为了嘲弄一下那些夸夸其谈型的、对自己见解的正确性总是深信不疑的物理学家，我是根本不会提及此事的。但归根到底，这种虚荣心的满足也许是他们力量的源泉，或使他们对物理的兴趣持续燃烧的燃料，因此人们也许不该为此而怪罪他们。

这段话虽未点名，显然是在批评泡利，语气则是苦涩中带着克制。也许正是由于克罗尼格亲自表达的这种克制，使得电子自旋概念历史发展中的这段曲折在后来较长的时间里，主要只在一些物理学家之间私下流传，而未在诸如玻尔的科摩演讲（1927年）、泡利的诺贝尔演讲（1946年）等公开演讲中被提及，也未被多数教科书及专著所记载。

泡利对电子自旋的反对并不仅限于针对克罗尼格，乌仑贝克和古兹米特的论文也受到了他“一视同仁”的反对。乌仑贝克和古兹米特的论文发表之后不久的1925年12月11日有一场物理学家们的盛大“派对”，主题是庆祝荷兰物理学家洛伦兹（Hendrik Lorentz）获博士学位50周年，地点在洛伦兹的学术故乡莱顿，参加者包括了爱因斯坦和玻尔。其中玻尔在前往莱顿途中于12月9日经过泡利的“老巢”汉堡，泡利和德国物理学家斯特恩（Otto Stern）一同到车站与玻尔进行了短暂的会面。据玻尔回忆，在会面时泡利和斯特恩“都热切地警告我不要接受自旋假设”。由于玻尔当时确实对自旋假设尚存怀疑，原因是自旋-轨道耦合的机制尚有疑问，这——用玻尔的话说——使得泡利和斯特恩“松了口气”。

不过那口气没松太久，因为玻尔的怀疑一到莱顿就被打消了——在莱顿他见到了爱因斯坦，爱因斯坦一见面就问玻尔关于旋转电子他相信什么？玻尔就提到了自己有关自旋-轨道耦合机制的疑问。爱因斯坦回答说那是相对论的一个直接推论。这一回答——用玻尔自己的话说——使他“茅塞顿开”，“从此再不曾怀疑我们终于熬到了苦难的尽头”。这里，玻尔提到的“苦难”是指一些已困扰了物理学家们一段时间，不用自旋假设就很难解释的诸如反常塞曼效应、碱金属原子双线光谱那样的问题，而“自旋-轨道耦合”

是解释碱金属原子双线光谱问题的关键。从莱顿返回之后，在给好友艾伦菲斯特（Paul Ehrenfest）的信中，玻尔表示自己已确信电子自旋是“原子结构理论中一个极其伟大的进展”。

就这样，不顾泡利和斯特恩的“热切警告”，玻尔“皈依”了电子自旋假设，并开始利用自己非同小可的影响力推介这一假设。在参加完“派对”的返回途中，他先后见到了海森伯和泡利，试图说服两人接受自旋假设。结果是海森伯未能抵挡住玻尔的雄辩，在给泡利的信中表示自己“受到了玻尔乐观态度的很大影响”，“以至于为磁性电子而高兴了”。泡利则不同，虽不知怎的一度给玻尔留下了良好的自我感觉，以至于使后者在12月22日给艾伦菲斯特的信中表示“我相信我起码已成功地使海森伯和泡利意识到了他们此前的反对不是决定性的”，实际上却始终没有停止过“顽抗”，而且不仅自己“顽抗”，还一度影响到了已站到玻尔一边的海森伯，使之又部分地站到了泡利一边。

泡利和海森伯虽都才二十几岁，却都早已是成熟而有声誉的物理学家了，尤其海森伯，当时已是矩阵力学的创始人。他们继续对自旋假设持反对看法并不是意气之举，而是有细节性的理由的，那理由就是基于电子自旋对碱金属原子双线光谱问题所作的计算尚存在一个“因子2”的问题，即计算结果比观测值大了一倍。这个为泡利和海森伯的“顽抗”提供了最后堡垒的问题一度难倒了所有人，最终却被一位英国小伙子托马斯（Llewellyn Thomas）所发现的如今被称为“托马斯进动”的相对论效应所解决。托马斯进动的存在，尤其是它居然消除了“因子2”那样显著的差异，而不像普通相对论效应那样只给出 v/c 一类的小量，大大出乎了当时所有相对论专家的意料。

托马斯的这项工作是在哥本哈根完成的，玻尔自然第一时间就知晓了。正为难以说服泡利和海森伯而头疼的他非常高兴，于1926年2月20日给两人各写了一封信，介绍托马斯的这项他称之为“对博学的相对论理论家及负有重责的科学家们来说是一个惊讶”的工作。其中在给海森伯的信中，他几乎是以宣告胜利的口吻满意而幽默地表示“我们甚至不曾在泡利对

我的惯常鲁莽的严父般的批评面前惊慌失措”。

不过，口吻虽像是宣告胜利，玻尔的信其实并未起到即刻的说服作用。海森伯和泡利收信后都提出了“上诉”，其中态度不太坚定的海森伯的“上诉”口吻也不那么坚定，只表示自己尚不能理解托马斯的论证，“我想您对于不能很快理解这个的读者的糊涂是应该给予适当的照顾的”。泡利则不仅先后写了两封回信对托马斯的论证进行驳斥，并且建议玻尔阻止托马斯论文的发表或令其做出显著修改。稍后，古兹米特访问了泡利，他也试图说服泡利接受托马斯的论证，并且带来了托马斯的论文。泡利依然不为所动，在给克拉默斯的信中强力反驳。泡利的反对理由之一是不相信像托马斯所考虑的那种运动学因素能解决问题，在他看来，假如电子果真有自旋，就必须得有一个关于电子结构的理论来描述它，这个理论必须能解释诸如电子质量之类的性质。但是，玻尔3月9日的一封强调问题的症结在于运动学的信终于成功地完成了说服的使命。三天后，即3月12日，泡利在回信中表示：“现在我别无选择，只能无条件地投降了”，“我现在深感抱歉，因为我的愚蠢给您添了那么多麻烦”。在信的最后，泡利重复了自己的歉意：“再次请求宽恕（也请托马斯先生宽恕）”。

泡利的“投降书”标志着电子自旋概念得到公认的最后“障碍”被“攻克”，也结束了泡利的第一次错误。关于这次错误，托马斯曾在1926年3月15日给古兹米特的信中作过几句戏剧性——甚至不无戏谑性——的评论：“您和乌仑贝克的运气很好，你们有关电子自旋的论文在被泡利知晓之前就已发表并得到了讨论”，“一年多前，克罗尼格曾想到过旋转电子并发展了他的想法，泡利是他向之出示论文的第一个人……也是最后一个人”，“所有这些都说明上帝的万无一失并未延伸到自称是其在地球上的代理的人身上”——这最后一句显然是影射泡利的外号：“上帝的鞭子”。不过这一外号是艾伦菲斯特取的，起码就起源而言并非泡利的“自称”。

不过，虽然泡利这次错误的过程及最终的“无条件地投降”和“请求宽恕”都有一定的戏剧性——尤其是与他批评尖刻和不留情面的名声相映成趣的戏剧

性，但真正的戏剧性却是在幕后。事实上，在电子自旋概念的问世过程中，貌似扮演了“反面角色”的泡利在很大程度上其实是最重要的幕后推手。不仅如此，关于泡利这次错误本身，我们也很有些可以替他辩解的地方。这些——以及泡利跟克罗尼格彼此关系的后续发展等——我们将在下一节中作为泡利第一次错误的幕后花絮进行介绍。

三、第一次错误的幕后花絮

读者们想必还记得，上一节的叙述是从1925年1月克罗尼格提出电子自旋假设开始的。在本节中，我们将把时间范围稍稍延展一点，从跟克罗尼格、乌仑贝克、古兹米特有关的事件往前推一小段时间。在那段时间里，一个很显著的事实是：比那几位“小年轻”（其实乌仑贝克跟泡利同龄，另两位也只略小）都更早，泡利就已对后来成为电子自旋概念之例证的若干实验难题展开了研究。

这种研究的一个典型例子，是从1922年秋天到1923年秋天那段时间里，泡利对反常塞曼效应所做的思考。1946年，泡利在《科学》杂志撰文回忆当时的情形时，写过一段被广为引述的话：一位同事看见我在哥本哈根美丽的街道上漫无目的地闲逛，便友好地对我说：“你看起来很不开心啊”。我则恶狠狠地回答说：“当一个人思考反常塞曼效应时，他看上去怎么会开心呢？”

不过，尽管“看起来很不开心”，泡利的思考还是有成果的。比如当时虽不成功但比较流行的一种设想，是用原子内层电子组成的所谓“核心”的性质来解释那些实验难题，泡利则认为外层电子的性质才是问题的关键所在。这种将注意力由群体性的内层电子转向个体性的外层电子的做法，是往解决问题的正确方向迈出的重要一步。

更重要的一步则是1924年底，泡利在对包括那些实验难题在内的大量实验现象及理论模型进行分析的基础之上，提出了著名的泡利不相容原理。

放在大背景下看，虽然泡利是我非常喜欢，并且是迄今唯一写过多篇文章加以介绍的物理学家，但平心而论，与同时代的其他量子力学先驱——尤其是与他几乎同龄的海森伯和狄拉克（Paul Dirac）——的贡

献相比，“泡利不相容原理”这一泡利的“招牌贡献”是比较逊色的，简直就是一个经验定则。这一点泡利本人估计也是清楚的——据印度裔美国科学史学家梅拉（Jagdish Mehra）回忆，泡利在去世前不久曾跟他说过这样的话：“年轻时我以为自己是当时最好的形式主义者，是一个革命者。当伟大的问题到来时，我将是解决并书写它们的人。伟大的问题来了又去了，别人解决并书写了它们。我显然是一个古典主义者，而不是革命者。”

不过，放在大背景下看虽比较逊色，对于电子自旋概念的诞生来说，泡利不相容原理的影响却是非常重要的。

用最简单的话说，泡利不相容原理有两层内涵：一是给出了描述原子中电子状态的一组共计四个量子数；二是指出了不能有两个电子的量子数取值完全相同。两层内涵之中，“不相容”性体现在第二层，对电子自旋概念的诞生有重要影响的则是第一层，即对原子中电子状态的描述。克罗尼格曾经回忆说，他1925年1月从美国来到朗德的实验室访问时，朗德给他看了泡利写给自己的一封信，那封信包含了泡利不相容原理的一种“具有泡利特色”的非常清晰的表述。在表述中，泡利赋予电子的四个量子数之一的取值为轨道角动量的分量加上或减去 $1/2$ 。这样一个量子数与电子自旋概念可以说是只有一步之遥了，因为能与轨道角动量的分量相加减，同时又属于电子本身的物理量还能是什么呢？最自然的诠释无疑就是自旋角动量。而加上或减去的数值为 $1/2$ 则无论从数值本身还是从只有两个数值这一特点上讲，都意味着自旋角动量的大小为 $1/2$ 。泡利提出了这样一个量子数，却居然没有亲自提出电子自旋概念，甚至在有人提出之后还一度反对，这是为什么呢？我们将在稍后进行评述。但泡利这封信对克罗尼格的影响是巨大的，用克罗尼格自己的话说，他一看到泡利这封信，就“立刻想到”那 $1/2$ “可以被视为电子的内禀角动量”。因此，克罗尼格虽然是因泡利的冷水而与率先发表电子自旋概念的机会失之交臂，但这一机会的出现本身却也得益于泡利，可谓“成也萧何，败也萧何”。

不仅如此，乌仑贝克和古兹米特之提出电子自旋

概念，同样也是受到了泡利不相容原理的影响。在提出电子自旋概念 30 年后的 1955 年，昔日的“小年轻”乌仑贝克获得了莱顿大学的以洛伦兹名字命名的资深教职，在为接受这一职位而发表的演讲中，他回顾了提出电子自旋概念的经过，其中明确提到“古兹米特和我是通过研读泡利的一篇表述了著名的不相容原理的论文而萌生这一想法的。”

因此，说泡利是电子自旋概念问世过程中最重要的幕后推手是毫不过分的（虽然在主观上，他不仅不支持，一度还反对所“推”出的概念）。事实上，1934 年，泡利甚至因这方面的贡献而与古兹米特一同被法国物理学家布里渊（Léon Brillouin）提名为诺贝尔物理学奖的候选人——可惜并未因之而真正获奖（泡利真正获奖是 1945 年因泡利不相容原理）。

现在让我们回到刚才的问题上来：一位如此重要的幕后推手，提出了与电子自旋概念如此接近的量子数，却为何没有亲自提出电子自旋概念，甚至在有人提出之后还一度反对？原因主要有两个。其中首要的原因在于泡利是当时接受量子观念最彻底的年轻物理学家（甚至可以说没有“之一”），很激烈地排斥有关微观世界的经典模型（从这个意义上讲，他对梅拉所说的年轻时以为自己是“革命者”其实是很贴切的评价）。在那几年发表的论文中，他甚至尽力避免带有经典模型色彩的诸如“轨道角动量”、“总角动量”等当时已被包括他导师索末菲（Arnold Sommerfeld）在内的很多物理学家所采用的术语，而宁愿改用“量子数 k ”、“量子数 j_p ”那样的抽象名称，即便在不得不使用前者时——比如在为了与索末菲的术语相一致时——也常在其后添上“量子数”一词，以突出非经典的特性。那个使克罗尼格“立刻想到”“可以被视为电子的内禀角动量”的 $1/2$ ，则被他完全抽象地称为了“描述电子的一种‘双值性’”。在这样的“革命习惯”下，泡利之反对电子自旋概念就变得顺理成章了——正如他在 1946 年所做的诺贝尔演讲中回忆的，初次接触到有关电子自旋的想法时，他就“因其经典力学特性而强烈地怀疑这一想法的正确性”。如今回过头来看，可以替泡利辩解的是，他对电子自旋概念的反对虽被公认为是错误，但他的怀疑角度其实

算不上错，因为电子自旋概念虽已被普遍接受，其不具有经典模型这一特点也同样已被普遍接受。假如泡利对待电子自旋概念像他偶尔对待其他带经典模型色彩的术语那样，只在其后添上“量子数”一词，以突出非经典的特性，则历史或许会少掉一些波折。

泡利反对电子自旋概念的另一个原因，是他早在 1924 年就亲自研究过粒子自旋的经典模型，他的计算表明核子自旋是可能的，但电子自旋由于是相对论性的（即转动线速度与光速相比并非小量），其角动量不是运动常数，而跟随时可变的电子的相对论运动质量密切相关，从而与电子自旋假设所要求的自旋角动量的分立取值相矛盾。他的这个怀疑角度也是很值得赞许的，因为它不仅比洛伦兹的计算（参阅^①）更早，而且也显示出泡利是一个既注重观念，又不完全拘泥于观念的物理学家——他在观念上激烈地排斥经典模型，却并未因此而摒弃针对经典模型的脚踏实地的计算，他的“一言之贬”的背后是有缜密的思考背景的。可惜的是，电子自旋确实是不存在经典模型的，从而脚踏实地的计算反而为泡利反对电子自旋概念提供了进一步的理由。在这点上，他跟乌仑贝克和古兹米特因洛伦兹的计算而决定不发表文章（参阅^①）是类似的——所不同者，乌仑贝克和古兹米特由艾伦菲斯特替他们做了主，泡利则不仅做了自己的主，还影响了克罗尼格。

评述完泡利反对电子自旋概念的原因，顺便也谈一点电子自旋概念的后续发展——因为那跟泡利也有着密切关系。泡利虽一度反对电子自旋概念，但在“投降”之后却率先给出了电子自旋的数学描述。这方面与他竞争的有海森伯、德国数学家约当（Pascual Jordan）、英国物理学家达尔文（Charles Galton Darwin）等人。那些竞争者都试图用矢量来描述电子自旋，结果未能如愿。泡利 1927 年采用的泡利矩阵及二分量波函数的描述表示则取得了成功。电子自旋的数学表述最终使自旋获得了一个抽象意义，即成为了旋转群的一个表示，这对泡利来说是不无宽慰的。多年之后，他在为玻尔 70 岁生日撰写的文章中特别提到，“在经过了一小段心灵上的和人为的混乱之后”，人们达成了以抽象取代具体图像的共识，特别是“有

关旋转的图像被三维空间旋转群的表示这一数学特性所取代”。

作为花絮的尾声，我们来谈谈泡利与克罗尼格彼此关系的后续发展。从上一节引述的克罗尼格给玻尔的信件来看，克罗尼格在为自己的不够自信感到后悔的同时，对泡利是颇有些不满的，以至于要“嘲弄一下那些夸夸其谈型的、对自己见解的正确性总是深信不疑的物理学家”，甚至说出了“这种虚荣心的满足也许是他们力量的源泉，或使他们对物理的兴趣持续燃烧的燃料”那样的重话。不过，一时的情绪并未使克罗尼格与泡利的关系从此恶化，相反，他们后来的人生轨迹有着持久而真诚的交汇。

1928年4月，28岁的泡利成为了苏黎世联邦理工学院的理论物理教授，24岁的克罗尼格则应邀成为了他的第一任助教。后来，克罗尼格前往荷兰格罗宁根大学任职，泡利则替他写了推荐信。1935年，克罗尼格在荷兰乌特勒支大学遭遇了不愉快的经历——因不是荷兰人而在求职时败给了乌仑贝克，他写信向泡利诉苦，泡利立即回信进行了安慰，除表示克罗尼格是比乌仑贝克更优秀的物理学家外，还写道：“使我高兴的是，尽管在图宾根就你提出的自旋问题作出过胡乱评论，你仍然认为我配收到来信。”这实际上就是“历史问题”向克罗尼格正式道了歉。

1958年，物理学家们开始替即将到来的泡利的60岁生日筹划庆祝文集。克罗尼格为文集撰写了篇幅达30多页的长文。在文章中，他回忆了与泡利交往的点点滴滴，其中包括在苏黎世担任泡利助教期间跟泡利及瑞士物理学家谢尔（Paul Scherrer）一同出去游泳、远足，穿着浴衣吃午饭，监视着不让泡利吃太多冰淇淋，等等的趣事。在文章的末尾，他写道：“我时常追忆在苏黎世的岁月，不仅作为最有教益的时光，而且也是我一生中最振奋的时期。”

1958年12月15日，泡利在苏黎世去世，筹划中的庆祝文集后来成为了纪念文集，玻尔为文集撰写了序言，海森伯、朗道（Lev Landau）、吴健雄（C. S. Wu）等十几位泡利的生前友朋撰写了文章，克罗尼格的长文紧挨着玻尔的序言被编排在正文的第一篇。克罗尼格为长文添加了一小段伤感的后记：“上文的最

后一段写于12月14日，泡利去世前的那个晚上。泡利的去世对他的所有朋友都是一个巨大的震惊。在他们的记忆里，以及在物理学史上，他将永远占据一个独一无二的位置。”这段后记为他和泡利30多年的友谊画下了真诚的句号。

四、泡利的第二次错误：宇称守恒

现在我们来谈谈泡利的第二次错误——有关宇称守恒的错误。

1956年6月，泡利收到了来自李政道（T. D. Lee）和杨振宁（C. N. Yang）的一篇题为《宇称在弱相互作用中守恒吗？》的文章。这篇文章就是稍后发表于《物理评论》杂志，并为两位作者赢得1957年诺贝尔物理学奖的著名论文《弱相互作用中的宇称守恒质疑》的预印本。李政道和杨振宁在这篇文章中提出宇称守恒在强相互作用与电磁相互作用中均存在很强的证据，在弱相互作用中却只是一个未被实验证实的“外推假设”。不仅如此，他们还提出当时困扰物理学界的所谓“ θ - τ 之谜”，即因宇称不同而被视为不同粒子的 θ 和 τ 具有完全相同的质量与寿命这一奇怪现象，有可能正是宇称不守恒的证据，因为 θ 和 τ 有可能实际上是同一粒子。他们并且还提议了一些检验弱相互作用中宇称是否守恒的实验。

但泡利对宇称守恒却深信不疑，对于检验弱相互作用中宇称是否守恒的实验，他在1957年1月17日给奥地利裔美国物理学家韦斯科夫（Victor Weisskopf）的信中表示（着重是原信就有的）：“我不相信上帝是一个弱左撇子，我准备押很高的赌注，赌那些实验将会显示……对称的角分布……”这里所谓“对称的角分布”指的是宇称守恒的结果——也就是说泡利期待的是宇称守恒的结果。

富有戏剧性的是，比泡利的信早了两天，即1957年1月15日，《物理评论》杂志就已收到了吴健雄等人的论文《贝塔衰变中宇称守恒的实验检验》，为宇称不守恒提供了实验证明；比泡利的信早了一天，即1957年1月16日，消息灵通的《纽约时报》就已用《物理学中的基本概念在实验中被推翻》为标题，在头版报道了被其称为“中国革命”的吴健雄等人的实验。

区区一两天的消息滞后，让泡利不幸留下了“白纸黑字”的错误。

但泡利的消息也并非完全不灵通，在发出那封倒霉信件之后几乎立刻，他就也得知了吴健雄实验的结果；到了第四天，即1957年1月21日，各路“坏”消息就一齐汇总到了他那里：首先是上午，收到了李政道和杨振宁等人的两篇新论文，外加瑞士物理学家维拉斯（Felix Villars）转来的《纽约时报》的报道（即那篇1月16日的报道）；其次是下午，收到了包括吴健雄实验在内的三组实验的论文。这些结果使泡利感到“很懊恼”，唯一值得庆幸的是他没有真的陷入赌局，从而没有因“很高的赌注”遭受钱财损失——他在给韦斯科夫的另一封信中表示，“我能承受一些名誉的损失，但损失不起钱财”。稍后，在给玻尔的信中，泡利的懊恼心情平复了下来，以幽默的笔调为宇称守恒写了几句诤文：我们本着一种伤心的职责，宣告我们多年来亲爱的女性朋友——宇称——在经历了实验手术的短暂痛苦后，于1957年1月19日平静地去世了。诤文的落款是当时已知的三个参与弱相互作用的粒子：“ e, μ, ν ”（即电子、 μ 子、中微子）——不过细心的读者也许注意到了，泡利把宇称“去世”的日期搞错了几天，不知这是否意味着心情尚未完全平复？

1957年8月5日，泡利在给瑞士精神科医生兼心理学家荣格（Carl Jung）的信中为自己的此次错误作了小结：“现在已经确定上帝仍然是——用我喜欢的表述来说——弱左撇子”，“在今年1月之前，我对这种可能性从未有过丝毫考虑”。

如果深挖“历史旧账”的话，那么泡利对宇称守恒的深信不疑还使他在二十多年前的另一个场合下犯过错误。1929年，著名德国数学家外尔（Hermann Weyl）从数学上提出了一个二分量的量子力学方程式，描述无质量的自旋 $1/2$ 粒子。这个方程式的一个显著特点就是不具有宇称对称性。1933年，泡利在被称为量子力学“新约”的名著《量子力学的普遍原理》中，以不具有宇称对称性为由，将这一方程式判定为了不具有现实意义。在宇称守恒受到李政道和杨振宁的质疑之后，几乎与实验证实同时，李政道和杨振宁、苏

联物理学家朗道、巴基斯坦物理学家萨拉姆（Abdus Salam）等人都重新引入了不具有宇称对称性的二分量方程式，用以描述此前不久才被发现，与宇称不守恒有着密切关系的中微子。而泡利则在1958年再版自己的“新约”时针对这些进展添加了注释，成为“新约”中量子力学部分为数极少的修订之一。

五、第二次错误的幕后花絮

以上就是泡利第二次错误的大致情形。值得一提的是，泡利的两次错误都未诉诸论文，这跟爱因斯坦和玻尔的错误相比，无疑是情节轻微的表现。此外，与他在第一次错误中实际起到了“幕后推手”作用，且颇有可辩解之处相类似，泡利的第二次错误不仅情节轻微——甚至没有像第一次错误那样对别人产生过负面影响（即便是“历史旧账”里的二分量方程式，虽被他“错划为”不具有现实意义，但在中微子被发现之前原本也不具有“现实意义”），而且同样也起到了某种“幕后推手”作用，并且也同样有一些可辩解之处。这可以算是泡利第二次错误的幕后花絮。

我们在玻尔的错误一文中曾经提到，1929年，在试图解决 β 衰变中的能量问题时，玻尔再次提出了能量不守恒的提议，并遭到了泡利的反对。但是，比单纯的反对更有建设性的是，泡利于1930年提出了解决这一问题的正确思路：中微子假设——虽然“中微子”这一名称是意大利物理学家费米（Enrico Fermi）而不是泡利所取的。

泡利不仅提出了中微子假设，而且积极呼吁实验物理学家去搜索它。1930年12月4日，他给在德国图宾根参加放射性研究会议的与会者们发去了一封措辞幽默的公开信。这封公开信以“亲爱的放射性女士和先生们”为称呼，以表达因参加一个舞会而无法与会的“歉意”为结束，内容则是推介他的中微子假设。泡利在信中表示自己“迄今还不敢发表有关这一想法的任何东西”，但由 β 衰变中的能量问题所导致的“局势的严重性”使他觉得“不尝试就不会有收获”，“必须认真讨论挽救局势的所有办法”，他因此呼吁对中微子假设进行“检验和裁决”。

由于相互作用极其微弱，中微子直到1956年才由美国物理学家柯温（Clyde Cowan）和莱因斯

(Frederick Reines) 等人在实验上找到。这个由泡利提出并呼吁搜索的意在解决 β 衰变中的能量问题的中微子不仅是弱相互作用的核心参与者之一，而且其状态及相互作用都直接破坏宇称对称性，从而堪称是宇称不守恒的“罪魁祸首”——虽然在吴健雄等人的实验中，中微子并不是被直接探测的粒子。从这个意义上讲，泡利对于宇称不守恒而言，是起到了某种“幕后推手”作用的，最低限度说，也是有着藕断丝连的正面影响的，这使他的第二次错误也如第一次错误那样，具有了独特的戏剧性。泡利自己对这种戏剧性也有过一个简短描述：在吴健雄实验成功后不久，泡利在给这位被他赞许为“无论作为实验物理学家还是聪慧而美丽的年轻中国女士”都给他留下深刻印象的物理学家的祝贺信中写道：“中微子这个粒子——对其而言我并非局外人——还在为难我”。

泡利为什么对宇称守恒深信不疑呢？他后来在给吴健雄的信中解释说，那是因为宇称在强相互作用下是守恒的，而他不认为守恒定律会跟相互作用的强度有关，因此不相信宇称在弱相互作用下会不守恒。不过，这一理由虽适用于他 1957 年的观点，却似乎不足以解释他的“历史旧账”，即在 1933 年出版的量子力学“新约”中以宇称不守恒为由将外尔的二分量中微子方程式视为不具有现实意义。因为那时强相互作用的概念才刚刚因中子的发现（1932 年）而诞生，参与强相互作用的重要粒子——介子——尚未被发现，而介子的宇称更是迟至 1954 年才得到确立，那时的宇称守恒哪怕在强相互作用下恐怕也算不上已被确立，而只是有关对称性的普遍信念的一部分，或是被温伯格列为爱因斯坦的错误之一的“以美学为动机的简单性”的一种体现。也许，对那种普遍信念的追求才是泡利此次错误的真正或最早的根源。

关于泡利的第二次错误，也有一些可替他辩解的地方，因为无论是有关对称性的普遍信念，还是具体为对宇称守恒的深信不疑，在当时都绝非泡利的独家观点，而在很大程度上可以算是主流看法。虽然李政道和杨振宁的敏锐质疑极是高明，但在质疑得到证实之前，那种主流看法本身其实谈不上错误，因为科学寻求的是对自然现象逻辑上最简单的描述，而对称性

正是一种强有力的简化描述的手段。在被证实失效之前，对那样的手段予以信任、坚持，乃至外推是很正常的，也是多数物理学家的共同做法。比如美国实验物理学家拉姆齐 (Norman F. Ramsey, Jr.) 曾就是否该将宇称不守恒的可能性诉诸实验征询费曼 (Richard Feynman) 的看法，费曼表示他愿以 50:1 的比例赌那样的实验不会发现任何东西。这跟泡利的“很高的赌注”有着同样的“豪爽”。可惜拉姆齐虽表示这赌约对他已足够有利，却并未真正付诸实践，从而费曼也跟泡利一样在钱财上毫发无损。又比如瑞士物理学家布洛赫 (Felix Bloch) 曾与斯坦福大学物理系的同事打赌，如果宇称不守恒，他愿吃掉自己的帽子——后来不得不狡辩说幸亏自己没有帽子！这些物理学家都不是无名之辈：布洛赫是 1952 年诺贝尔物理学奖得主，费曼是 1965 年诺贝尔物理学奖得主，拉姆齐是 1989 年诺贝尔物理学奖得主。

最后还有一点值得提到，那就是：泡利从 1952 年就开始研究场论中的离散对称性，是对基本粒子理论中的对称性进行研究的先驱者和顶尖人物之一。1954 年，他与德国物理学家吕德斯 (Gerhart Lüders) 在能量有下界、洛伦兹不变性等场论的最一般性质的基础上证明了所谓的 CPT 对称性——即由电荷共轭、宇称及时间反演组成的联合对称性必须成立。这个被称为吕德斯-泡利定理或 CPT 定理的著名结果在当时似乎是多此一举的，因为其所涉及的电荷共轭、宇称及时间反演对称性被认为分别都是成立的。但随着宇称不守恒的发现，很多同类（即离散）的对称性，如电荷共轭对称性、时间反演对称性、电荷共轭及宇称联合对称性（简称 CP）等相继“沦陷”，唯有 CPT 对称性如激流中的磐石一般屹立不倒，使 CPT 定理的重要性得到了极大的凸显，成为量子场论尤其是公理化量子场论中最基本的定理之一。

六、结语

有关泡利的错误就介绍到这里了。泡利那广为人知的尖刻和不留情面或许会给人一个刚愎自用、不易相处的印象，其实，在真正熟悉泡利的人眼里，与泡利共事不仅是一种殊荣，也是一种愉快——就如克罗尼格所回忆的：泡利不愿容忍粗疏的思考，却随时准

备着给予别人应得的荣誉，并且随时准备着承认自己的错误——只要有人能提出有效的反驳。他也很乐意以参加周日远足的方式让你平衡他在苏黎世湖上游泳的优势，因为远足对他要比对小块头的人来得困难。这就是泡利——智慧、坦诚、幽默，甚至带点体贴的泡利。

最后要说明的是，我们介绍泡利的错误，绝不是拿泡利寻开心，而是与介绍爱因斯坦的错误和玻尔的错误有着相同的用意，即试图说明无论声誉多么崇高、功力多么深厚、思维多么敏锐的科学家都几乎难免会犯错。犯错无损于他们的伟大，也无损于科学的伟大。事实上，科学一直是犯着错误，不断纠正着错误才走到今天的，永远正确绝不是科学的特征；相反，假如有什么东西标榜自己永远正确，那倒是最鲜明不过的指标，表明它绝不是科学。

作者简介

卢昌海，本科毕业于上海复旦大学物理系，后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究，并获物理学博士学位。现旅居纽约。著有《那颗星星不在星

图上：寻找太阳系的疆界》、《太阳的故事》、《黎曼猜想漫谈》、《从奇点到虫洞：广义相对论专题选讲》、《小楼与大师：科学殿堂的人和事》等，个人主页：<http://www.changhai.org/>。



① 这指的是乌仑贝克和古兹米特有关电子自旋的第二篇论文，发表于1926年2月20日。这篇论文由于末尾附有玻尔的评论，因此反响较大。此外，这篇论文的内容较广，且首次引进了“自旋”一词。乌仑贝克和古兹米特有关电子自旋的第一篇论文发表于三个月前的1925年11月20日，且发表过程本身也不无曲折和戏剧性：在他们论文发表之前的10月16日，他们的导师艾伦菲斯特就在给荷兰物理学家洛伦兹的信中提及了他们的工作，后者作为经典电子论的代表人物，很快就对电子作为经典带电球的转动方式进行了计算，结果发现为了给出乌仑贝克和古兹米特所假设的自旋大小，电子表面的转动线速度必须比光速还大得多。乌仑贝克和古兹米特得知这一结果后大为吃惊，决定不发表这一工作，但艾伦菲斯特已将他们的论文寄出，并安慰说：“你们都还足够年轻，干点蠢事没关系”。

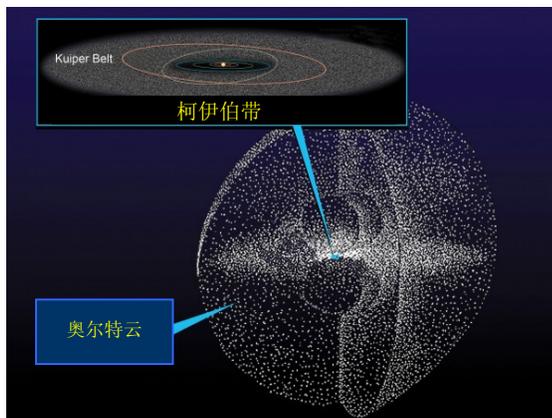


科苑快讯

80 亿颗小行星暗藏于奥尔特云

我们太阳系的小行星带位于火星和木星之间，其中包含数十万颗小天体。但是最新研究却表明，在更远处一个长期认为是由彗星和其他冰态天体占据的区域，却可能有数十亿颗岩石天体在围绕太阳运转。

研究者利用计算机程序模拟围绕年轻太阳运行的天体命运，当时其行星盘曾被大量清除了气体和尘埃。随后 45 亿年行星间的引力相互作用导致其中一些天体撞向太阳，其他天体则被彻底甩出太阳系。不过，其中许多天体被流放到了奥尔特云，这是一个远远超出海王星之外的球形云团，同时距离我们最近的恒星邻居亦相当远（小图中的奥尔特云与太阳系相比，距离柯伊伯带更近）。当然那些被驱逐的小行星中，有 4% 来自距离太阳 3.75 亿千米的轨道，这使它们成为富含岩石和金属的小行星，而不是彗星那样的冰态天体。研究者于《英国皇家天文学会月刊》（*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*）的论文付梓之前，先在其网站上做了报导。



研究者说，以前的观测表明奥尔特云中包含 2000 亿颗彗星。如果该数据准确的话，最新结果则说明这些彗星与 80 亿颗小行星相伴。其中任何一颗飞向地球，将比彗星更难发现（因为其亮度更暗），而且由于飞行速度更快，要比典型的近地小行星更难转向。但是不用担心，研究者估计这样的毁灭性撞击可能每 10 亿年才会发生一次。

（高凌云编译自 2014 年 12 月 18 日 www.sciencemag.org）